

Evaluación del desempeño de dispositivos de Alta Frecuencia manufacturados frente a los disponibles comercialmente y potenciación del Laboratorio de Microondas para Mmwave

Evaluation of the performance of manufactured High Frequency Devices versus those commercially available and empowerment of the Microwave Laboratory for Mmwave

Stalin Angamarca, Marcelo Guzmán
Escuela Superior Politécnica De Chimborazo, Riobamba, Ecuador
stalin.angamarca@esPOCH.edu.ec, marcelo.guzman@esPOCH.edu.ec

Resumen.- Se implementó divisores de potencia, multiplicadores de frecuencia y antenas logarítmicas en las bandas X y Ku, con los cuales se realizó la comparativa entre los equipos implementados versus los del fabricante. Para la elaboración de los dispositivos se utilizó la metodología de diseño de tecnología microstrip haciendo uso del software Ansoft Designer y para la implementación se usaron dos sustratos diferentes, los cuales son; FR4 y Roger RT Duroid 5880. Además, se hizo uso de un analizador de redes vectoriales para obtener los resultados de transmisión y reflexión, mientras que, para obtener resultados aplicativos, se hace uso de un generador de señales y un analizador de espectro. Los dispositivos implementados con sustrato Roger presentaron mejores prestaciones al compararlo con los del fabricante, sin embargo, el sustrato FR4 no presenta características favorables.

Palabras clave: Alta Frecuencia, Potencia, Microstrip, Redes Vectoriales, Sustrato.

Abstract.- Power dividers, frequency multipliers and logarithmic antennas were implemented in the X and Ku bands, with which the comparison between the implemented equipment versus the manufacturer's was carried out. For the elaboration of the devices, the microstrip technology design methodology was used, using the Ansoft Designer software, and for the implementation, two different substrates were used, which are FR4 and Roger RT Duroid 5880. In addition, a vector network analyzer was used to obtain the transmission and reflection results, while, to obtain applicative results, a signal generator and a spectrum analyzer are used. The devices implemented with Roger substrate presented better performance when compared to those of the manufacturer,

however, the FR4 substrate does not have favorable characteristics.

Keywords: High Frequency, Power, Microstrip, Vector Networks, Substrate.

I. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, las comunicaciones mediante radares han sido una de las pioneras en explorar el espectro de ondas milimétricas.[1] Es por ello que los equipos de microondas tienen un costo elevado debido a su complejidad y precisión, para operar en la banda de 3-300 GHz. [2]Existen diversos trabajos sobre el diseño e implementación de dispositivos de alta frecuencia. Peñafiel realizó la Implementación de una Antena Logarítmica Ultra Wide Band de 1 a 10 GHz, para la Caracterización de Antenas con sustrato Roger Rt Duroid 5880, en donde las mediciones de la antena de pérdidas de regreso de la onda son menores a -35dB.[3] En el año 2017 se construyeron divisores tipo T con una variación de diseño en sus salidas, en las bandas (X y Ku), obteniendo valores de scattering de transmisión menores a -9dB y parámetros de reflexión menores a -25dB.[4] En Ecuador se construyeron multiplicadores de potencia X2, X3 y X4, se usó el sustrato Roger RO4003C para su implementación en las bandas C,X y Ku. [5]

Para el diseño y simulación de las antenas logarítmicas y divisores de potencia se utilizó el software Ansoft Designer. Estos dispositivos se implementaron en el laboratorio de microondas de la Facultad de Informática y Electrónica (FIE), utilizando los sustratos Roger Rt Duroid 5880 y FR4, en las bandas X y Ku. A través del fabricante Mini-Circuits se adquirieron los dispositivos EP2K+ (multiplicador de frecuencia) que opera en la banda de 6-20 GHz con un factor de multiplicación X2 y CY2-44+ (divisor de potencia) que opera entre 5 y 20 GHz con tecnología MMIC. Se hace uso de un analizador de redes vectoriales para poder obtener los

resultados de transmisión y reflexión, mientras que, para obtener resultados aplicativos, se hace uso de un generador de señales y un analizador de espectro. Debido al gran costo de los dispositivos microondas, el alcance de las investigaciones está sujeta a la inversión económica que se realice, en adquirir dispositivos que operen a altas frecuencias. Por lo que se tiene como objetivo evaluar el desempeño de dispositivos de alta frecuencia construidos en la FIE frente a los realizados por el fabricante y potenciar el laboratorio de microondas para mmwave.

II. METODOLOGÍA

A. Antena log periódica

Una antena Log Periódica es la agrupación de dipolos de forma periódica. La geometría de esta antena se muestra en la Fig 1. [6]

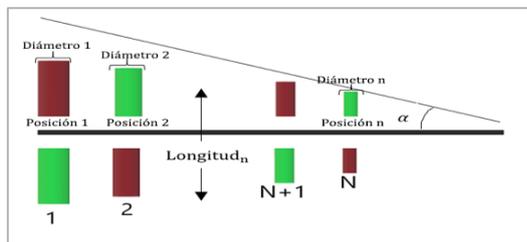


Fig 1. Agrupación Log Periódica de dipolos.

Para el diseño de la antena se necesita calcular las dimensiones de los dipolos, su ubicación y su diámetro, teniendo en cuenta la banda de operación en la cual va a trabajar, para ello se utilizan las siguientes formulas:

Factor de escala:

$$\tau \equiv \frac{l_i}{l_{i-1}} \quad 0.8 \leq \tau \leq 0.98 \quad (1)$$

$$\cot \alpha = \frac{4\sigma}{1-\tau} \quad (2)$$

Longitud de los dipolos más cortos y largos mediante:

$$L_{min} = k1 * \lambda_{sup} \quad L_{max} = k2 * \lambda_{inf} \quad (3)$$

Ancho de Banda relativo:

$$\left(B \equiv \frac{f_n}{f_1} \right) \quad (4)$$

$$B_{ar} = 1.1 + 7.7(1-\tau)^2 \cot \alpha \quad (5)$$

$$B_S = B * B_{ar} \quad (6)$$

Número de elementos:

$$N = 1 + \frac{\ln B_S}{\ln \frac{1}{\tau}} \quad \left\{ \begin{array}{l} \{N\} > 0.3 \rightarrow [N] = [N] \\ \{N\} \leq 0.3 \rightarrow [N] = [N] \end{array} \right\} \quad (7)$$

La simulación de la antena se realiza en el software Ansoft Designer, se debe tomar en cuenta el sustrato que se va a usar para la implementación, en este caso FR4 o Roger Rt Duroid 5880, dado que esto afecta a los resultados dependiendo la permitividad de cada material. Las dimensiones encontradas a

partir de las fórmulas no tienen en cuenta la permitividad del sustrato, por ende, se tiene que optimizar el diseño para que trabaje acorde al material utilizado para la implementación.

En la Tabla 1 se muestran los valores optimizados para la antena con sustrato FR4.

TABLA 1
MEDIDAS OPTIMIZADAS PARA SUSTRATO FR4.

Dipolo	Longitud (mm)	Posición (mm)	Diámetro (mm)
1	7.5	0	0.6
2	6.6	4.9	0.58
3	5.9	9.3	0.56
4	5.2	13.2	0.54
5	4.6	16.6	0.52
6	4.1	19.6	0.51
7	3.6	22.3	0.48
8	3.2	24.7	0.46
9	2.8	26.8	0.44
10	2.5	28.7	0.42
11	2.2	30.4	0.4

En la Fig 2 se muestra la antena con sustrato FR4 diseñada con las dimensiones optimizadas.

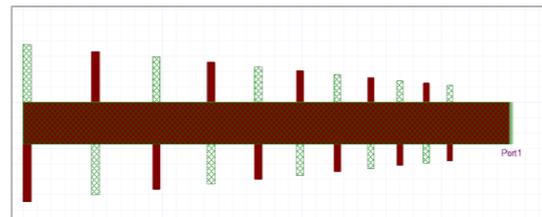


Fig 2. Antena FR4.

En la Tabla 2 se muestran los valores optimizados para la antena con sustrato Roger Rt Duroid 5880 en la banda de 10-20 GHz.

TABLA 2
MEDIDAS OPTIMIZADAS SUSTRATO ROGER RT DUROID 10-20 GHZ

Dipolo	Longitud (mm)	Posición (mm)	Diámetro (mm)
1	11	0	1.2
2	9.6	4.9	1.15
3	8	9.3	1.1
4	7.2	13.2	1.05
5	6	16.6	1
6	5.5	19.6	0.95
7	5	22.3	0.9
8	4.5	24.7	0.85
9	4	26.8	0.8
10	3.5	28.7	0.75
11	3	30.4	0.7

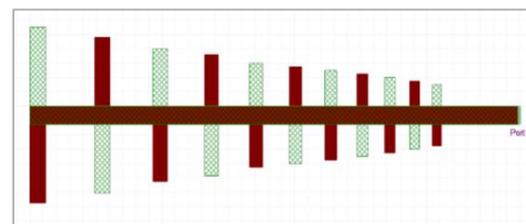


Fig 3. Antena Roger Rt Duroid 5880 10-20 GHz.

En la Fig 3 se muestra la antena con sustrato Roger Rt Duroid 5880 en la banda 10-20 GHz diseñada con las dimensiones optimizadas. En la Tabla 3 se muestran los valores optimizados para la antena con sustrato Roger Rt Duroid 5880 10-40 GHz.

TABLA 3
MEDIDAS OPTIMIZADAS SUSTRATO ROGER RT DUROID 20-40 GHZ.

Dipolo	Longitud (mm)	Posición (mm)	Diámetro (mm)
1	3.8	0	0.5
2	3.8	2.7	0.5
3	3.5	5.2	0.48
4	3.3	7.5	0.46
5	3.1	9.7	0.44
6	2.9	11.8	0.42
7	2.8	13.8	0.4
8	2.6	15.6	0.38
9	2.4	17.3	0.36

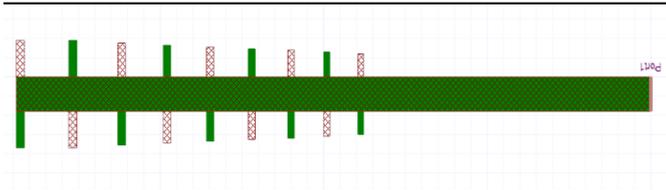


Fig 4. Antena Roger Rt Duroid 5880 20-40 GHz

En las Figs 2, 3 y 4 se observa que la cara inferior de la antena tiene color café, mientras que la cara superior tiene color verde, además su línea de transmisión es de 50 Ω.

3. Divisor de potencia

Los divisores de potencia son dispositivos pasivos los cuales son de gran utilidad al momento de dividir un valor de potencia en varias salidas, dichos divisores suelen ser simétricos, con el mismo valor a las salidas, pero no siempre lo son, ya que pueden ser asimétricos con valores diferentes a la salida, de la misma forma se los puede diseñar tal que a la salida exista un cambio de fase. Un divisor de potencia tipo T, un divisor de potencia puede tener más de 3 puertos de salida en los cuales la señal de entrada puede realizar la función de división o combinación de potencia de forma que cada puerta tenga el mismo nivel de señal que los demás [4]. Uno de los divisores más sencillos es el llamado divisor tipo T el mismo que posee dos salidas los cuales se encuentran conectados ya sea en serie o en paralelo a la línea de entrada. Cuando se diseñan divisores de potencia suelen parecer los transformadores $\lambda/4$ los cuales permiten acoplar diferentes impedancias, estos pueden ir o bien a las salidas del sistema o bien a la entrada o en ambos todo con el objetivo de un acople entre una impedancia de entrada a una nominal [7]. Este tipo de divisores se lo puede construir o diseñar ya sea por guía de onda o líneas microstrip [8]. El divisor EP2K+ tiene un ancho de banda de operación de 5 hasta 20 GHz, el cual provee una excelente potencia para aplicaciones de radiofrecuencia a altas frecuencia [9].

Gracias a la ayuda de Ansoft Designer se puede permitir realizar ciertos cálculos, uno de ellos es la obtención de líneas de transmisión, tan solo ingresando el valor de la impedancia que se necesita se obtendrá el ancho de la línea. Al tener un diseño de divisores de potencia simétrico de 1:2, se tiene un puerto de entrada y dos de salida que deben tener la misma respuesta, por lo cual la línea de transmisión a 50 ohm debe estar tanto para el puerto de salida 1 como para el puerto de salida 2, con lo cual estas deben encontrarse en paralelo una de otra. La distancia entre las dos salidas depende de una línea de transmisión, ya sea $\lambda/2$ o $\lambda/4$, esta línea de transmisión es calculada de la siguiente forma:

$$E_{eff} = \frac{Er + 1}{2} + \frac{Er - 1}{2} * \sqrt{\frac{1}{1 + 12 * \frac{h}{w}}} \quad (8)$$

$$E_{eff} = \frac{4.8 + 1}{2} + \frac{4.8 - 1}{2} * \sqrt{\frac{1}{1 + 12 * \frac{8}{3.051}}} \quad (9)$$

TABLA 4
VALORES DE CÁLCULO PARA PERMITIVIDAD EFECTIVA.

Frecuencia (GHZ)	h (mm)	W (mm)	E _{eff}
5.8	8	3.051	3.233
9.6	8	3.051	3.233
14.3	5	3.051	3.318
18.1	3.2	3.051	3.415

Una vez calculado los valores de dicha permitividad efectiva es necesario el cálculo de λ_0 el mismo valor que será necesario para poder obtener el λ que se necesita.

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{5.8 \times 10^9} \quad (10)$$

TABLA 5
VALOR DE λ_0 EN CADA FRECUENCIA DE DISEÑO.

Frecuencia (GHz)	λ_0 (m)
5.8	0.05172
9.6	0.03125
14.3	0.02098
18.1	0.01657

El valor de λ sirve para poder colocar de manera aproximada la línea de transmisión que unirá las salidas del divisor, esta distancia puede ser a $\lambda/2$ o $\lambda/4$.

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{E_{eff}}} = \frac{0.05172}{\sqrt{3.233}} \quad (11)$$

TABLA 6
RESULTADOS $\lambda/4$ PARA DISEÑO DE DIVISORES

Frecuencia (GHZ)	λ (mm)	$\lambda/2$ (mm)	$\lambda/4$ (mm)
5.8	28.764	14.38	7.19
9.6	17.379	8.689	4.345
14.3	11.517	5.759	2.879
18.1	8.967	4.483	2.242

Para el puerto de entrada se tendrá una línea de transmisión a 50 ohm es decir tendrá las mismas características que las líneas de transmisión en los puertos de salida, sin embargo, dicha línea no podrá ser colocada sin un acople ya que las impedancias que aparecen no son las mismas, con lo cual, mediante la calculadora se puede acoplar la línea de transmisión del puerto de entrada la que será llamada Z_0 y otra impedancia la cual será llamada. Esta última impedancia será diferente para cada diseño, ya que por su frecuencia tendera a variar por lo que se obtendrán valores característicos para cada frecuencia, cabe recalcar que dichos valores de impedancia pueden variar en función de las dimensiones de las líneas de transmisión o los acopladores.

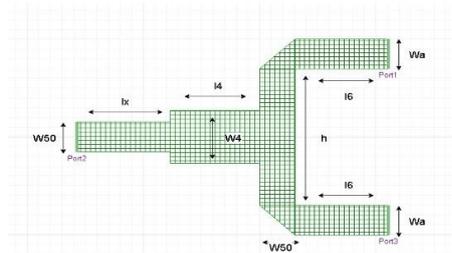


Fig 5. Divisor de potencia, diseño completo

Para poder lograr este acople entre dichas impedancias, se obtiene el ancho y el largo de la línea de transmisión mediante la calculadora del software. Una vez calculado todos los parámetros que intervienen en el diseño de divisores de potencia, tendremos el mismo diseño para distintas frecuencias con lo cual solo se variara las dimensiones de cada una de ellas.

TABLA 7
VALORES DE DISEÑO LA PARA LA IMPLEMENTACIÓN

Variable	Valor en mm a 5.8 GHz	Valor en mm a 9.6 GHz	Valor en mm a 14.3 GHz	Valor en mm a 18.1 GHz
w50	3.051	2.85	3.01	3.051
w4	5.382	5.1	4.1	4.65
wa	3.051	2.85	3.01	3.051
l4	7.7	4.1	2.4	1.95
Lx	8.032	9	7.2	4.9
l6	8	8	5	3.2
H	7.1	2.9	1.1	0.5

III. RESULTADOS

A. Antenas log periódica

Mediante el analizador de redes vectoriales y analizador de espectro se realizaron las diferentes mediciones. En la Fig 6 se muestra las mediciones de las dos antenas realizadas con sustrato FR4, de color azul y color rojo respectivamente, así como también de color verde la simulación en el software Ansoft Designer, se observa que todo el ancho de banda de 10-20 GHz se encuentra por debajo de -10 dB , por lo que tienen un funcionamiento mejor que la simulación. En la Tabla 8 se muestran los picos de frecuencia en donde se tiene la mayor ganancia de las antenas medidas.

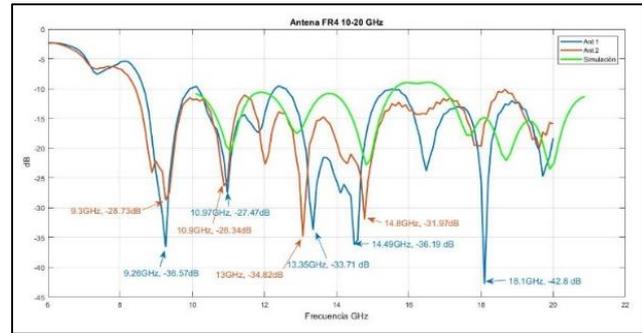


Fig 6. Antenas Roger Rt Duroid 5880.

TABLA 8
RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DE LAS ANTENAS FR4.

Antena 1			Antena 2		
Pico	Frecuencia (GHz)	dB	Pico	Frecuencia (GHz)	dB
1	9.26	-36.57	1	8.9	-24.1
2	10.97	-27.47	2	9.3	-28.73
3	11.83	-17.37	3	10.9	-26.34
4	13.35	-33.71	4	12	-22.7
5	14.49	-36.19	5	13	-34.82
6	16.48	-23.83	6	14.8	-31.97
7	18.1	-42.8	7	17.9	-19.5
8	19.71	-24.72	8	19.62	-20

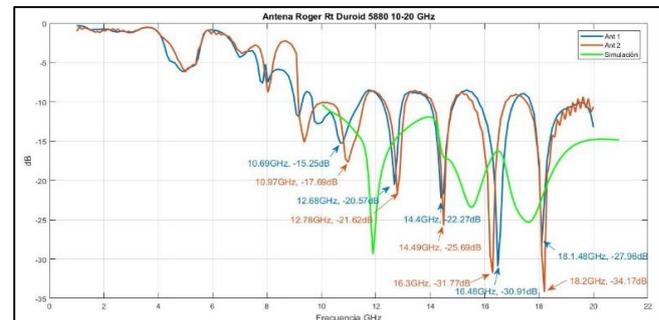


Fig 7. Antenas Roger Rt Duroid 5880.

En la Fig 7 se observa las mediciones de las dos antenas realizadas con sustrato Roger Rt Duroid Rt 5880, de color azul y color rojo respectivamente, así como también de color verde la simulación en el software Ansoft Designer. La variación que existe entre la simulación y la implementación pueda darse debido a que la placa Roger necesita más precisión en su implementación.

En la Tabla 9 se muestran los picos de frecuencia en donde se tiene la mayor ganancia de las antenas. Las dos antenas implementadas tienen una respuesta similar, pero difieren de la simulación, en donde se tienen picos diferentes en las frecuencias de:

- 11.9 GHz, -29.34 dB .
- 15.5 GHz, -23.3 dB .
- 17.6 GHz, -25.31 dB .

TABLA 9
RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DE LAS ANTENAS ROGER.

Antena 1			Antena 2		
Pico	Frecuencia	dB	Pico	Frecuencia	dB
	GHz			GHz	
1	10.69	-15.25	1	9.36	-15.12
2	12.68	-20.57	2	10.97	-17.69
3	14.4	-22.27	3	12.78	-21.62
4	16.48	-30.91	4	14.49	-25.69
5	18.1	-27.96	5	16.3	-31.77
			6	18.2	-34.17

Dado que el VNA tiene una frecuencia máxima de medición de 20GHz, no se puede medir la respuesta de las antenas en la banda de 20-40GHz, dado esto se midió de 10-20 GHz para que se pueda observar cual puede ser su comportamiento en altas frecuencias como se observa en la simulación de la Fig 8.

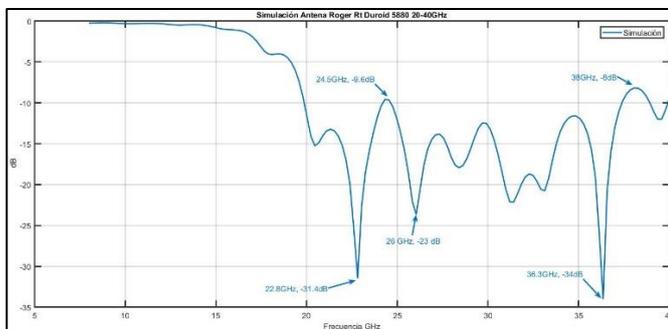


Fig 8. Antena Roger Rt Duroid 5880 20-40 GHz.

En la Fig 9 se muestra la medición de las antenas con sustrato Roger Rt Duroid 5880. Dado que estas antenas son diseñadas para operar de 20-40 GHz no se tiene una respuesta óptima en la banda de 10-20 GHz. Existen ciertas frecuencias en donde se podría transmitir ya que superan los -10 dB, pero no en todo el ancho de banda.

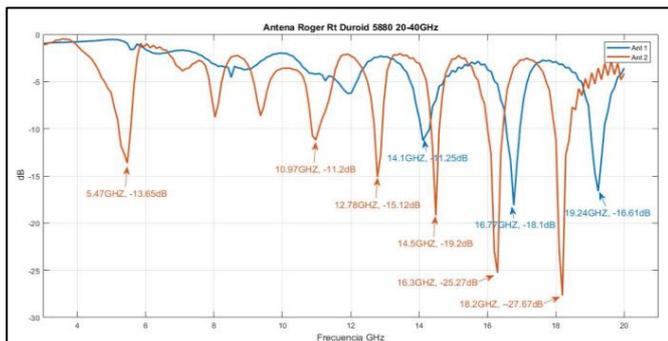


Fig 9. Antenas Roger Rt Duroid 5880 20-40 GHz.

B. Divisores de potencia

Los divisores de potencia diseñados a 5.8GHz (Tabla10) poseen una banda de operación de aproximadamente 2GHz, ya que desde 4.8GHz hasta los 6.8GHz se encuentran en valores inferiores a los -20 dB, mostrando así que los parámetros de reflexión S11 en esa banda es mínima.

TABLA 10
RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DIVISORES A 5.8 GHz.

Divisor	Simulado	Implementado	Fabricante
Frecuencia	5.8 GHz	5.83 GHz	5.75 GHz
S ₁₁	-32.43 dB	-26.64dB	-27.01dB
S ₂₁	-4.179 dB	-3.929 dB	-5.159 dB
S ₃₁	-4.178 dB	-5.771 dB	-5.213 dB

El divisor diseñado y el medido, posee una respuesta cercana en la frecuencia de diseño, obteniendo valores simulados de -32.54 dB (5.8 GHz), mientras los que lo valores medidos son de -26.64 dB (5.83 GHz), por lo cual, tiene una variación del 20 %. Ahora se considera el valor medido del divisor diseñado con respecto al del divisor del fabricante (EP2K+), el cual muestra en la frecuencia de 5.75 GHz (-27.01 dB), obteniendo una variación de 1.37% uno con respecto al otro.

Para los resultados de scattering en transmisión S₂₁, para la frecuencia de 5.8GHz tiene un valor medido de -4.179 dB para el divisor diseñado, mientras que en la simulación del mismo divisor se obtiene un valor de -3.929 dB, si comparamos el dispositivo diseñado con su simulación, tiene una mejora de un 5.98%, sin embargo, si se compara con los -5.159 dB (5.75 GHz) del divisor del fabricante, se obtiene que el divisor implementado obtiene un 18.99% de mejora. Los parámetros de scattering S₃₁ tendrá un comportamiento semejante al que se mostró en el S₂₁, por lo que se tiene que para el divisor diseñado posee -5.771 dB en la frecuencia de 5.83GHz mientras que en la simulación de este se obtuvo un valor de -4.178 dB, (5.83 GHz), esto indica que existe una pérdida de un 27% con respecto al valor simulado. Con respecto a los valores obtenidos del dispositivo del fabricante se obtuvo un valor de -5.213 dB (5.75 GHz), obteniendo un porcentaje de pérdida de 9.66% con respecto al dispositivo implementado.

TABLA 11
RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DIVISORES A 18.1 GHz.

Divisor	Simulado	Implementado	Fabricante
Frecuencia	18.1 GHz	18 GHz	18GHz
S ₁₁	-24.92dB	-16.28dB	-15.57dB
S ₂₁	-4.028 dB	-9.622 dB	-6.4 dB
S ₃₁	-4.022 dB	-9.06 dB	-6.58 dB

Divisores de potencia diseñados a 18.1GHz (Tabla11), obteniendo los parámetros de reflexión S₁₁, para la frecuencia de 18.1 GHz del divisor simulado un valor de -24.92 dB mientras que para las mediciones de la implementación se obtuvo un valor de -15.57 (18 GHz), por lo cual se dice que el valor medido de la implementación con respecto al simulado posee una pérdida del 37.52%. Si se hace una comparación con el valor obtenido del dispositivo del fabricante (EP2K+), el cual es de -16.28 dB (18 GHz), obteniendo así una diferencia del 34.67%.

Para los valores de scattering S₂₁, tienen una variación con respecto a los valores medidos ya que se obtiene valores de -9.06 dB (18 GHz) mientras que para los valores tanto simulados como para el fabricante (EP2K+) se obtiene -4.022 (18.1 GHz)

y de -6.58dB (18 GHz), respectivamente. Por lo que el valor medido pierde un 55.61% con respecto a los valores obtenido de la simulación y un 27.37% con respecto al fabricante (EP2K+). Por otra parte, los parámetros S31, para la frecuencia de 18.1 GHz del dispositivo implementado se obtiene un valor de -4.028 dB y para los valores simulados y del fabricante (EP2K+) se obtiene valores de -6.7 dB (18 GHz) y de -9.622 dB (18 GHz). Con lo cual se puede decir que tiene un comportamiento de pérdida de 58.14% del valor obtenido mediante las mediciones con respecto a los valores obtenidos de la simulación y un valor de 30.36% con respecto al divisor del fabricante (EP2K+).

Una vez realizado pruebas a diferentes frecuencias en el material FR4, se realiza el mismo diseño, con sustrato Roger. Se tiene los parámetros de scattering S11 los mismos que muestran una diferencia entre los divisores con sustrato Roger simulado y con el dispositivo implementado de 23.55dB (55.82%). Al comparar entre el divisor implementado con sustrato Roger y del fabricante, su diferencia es de 1.58dB (5.04%), mientras que si lo comparamos con el dispositivo implementado con sustrato FR4 posee una diferencia mucho mayor, de 16.43dB (35.57%) (Fig 10).

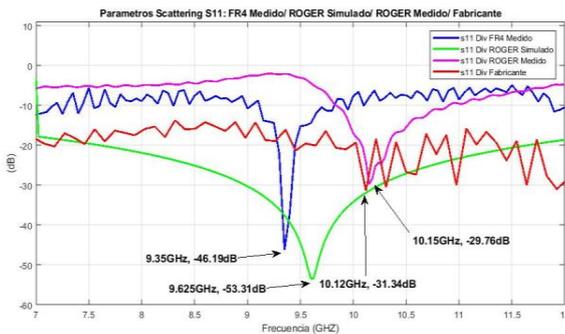


Fig 10. Parámetros S11 de los divisores de potencia con sustrato FR4, Roger y del Fabricante (EP2K+) (9.6 GHz).

Se tienen los resultados de transmisión S21, mostrando la diferencia entre el divisor con sustrato Roger simulado y el dispositivo implementado, de 4.605dB (146.79%). Al comparar entre el divisor implementado con sustrato Roger y del fabricante, su diferencia es de 1.92dB (33.02%), mientras que si lo comparamos con sustrato FR4 posee una diferencia mucho mayor, de 3.358dB (43.37%) (Fig 11).

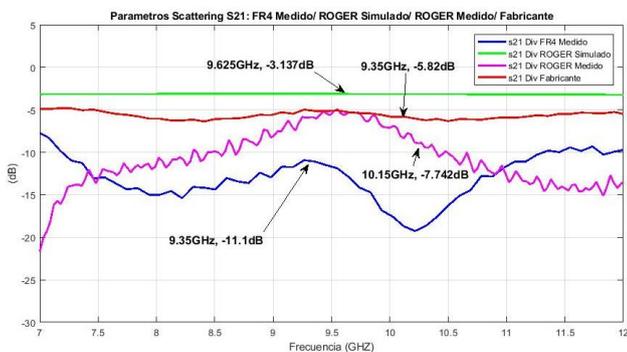


Fig 11. Parámetros S11 de los divisores de potencia con sustrato FR4, Roger y del Fabricante (EP2K+) (9.6 GHz).

Por otra parte, los parámetros S31 poseen un comportamiento similar al S21, es así como se tiene una diferencia entre el divisor con sustrato Roger simulado y el implementado, de 6.215dB (198.24%). De la misma forma si se compara el divisor implementado con sustrato Roger y del fabricante, su diferencia es de 3.597dB (63.176%), mientras que si lo comparamos con sustrato FR4 posee una diferencia mucho mayor, de 4.17dB (44.59%) (Fig 12).

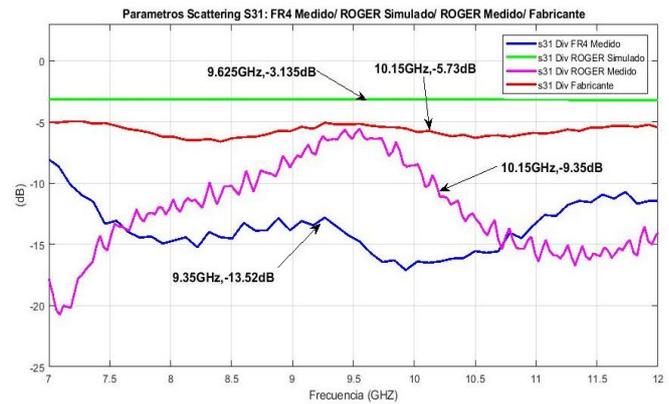


Fig 12. Parámetros S11 de los divisores de potencia con sustrato FR4, Roger y del Fabricante (EP2K+) (9.6 GHz).

C. Multiplicadores de frecuencia

El multiplicador de potencia CY4-44+ adquirido a la compañía Mini-Circuits se comparó con los dispositivos implementados en la tesis de “Hernández 2019” [5]. Los dos multiplicadores tienen características semejantes como la frecuencia de entrada (5-10 GHz), salida (10-20 GHz) y su factor de multiplicación X2.

Para medir el parámetro S11 de reflexión se utilizó el VNA, pero para el parámetro S21 de transmisión se utilizó el generador de señales y el analizador de espectro, ya que va a dar la medida real de señal multiplicada.

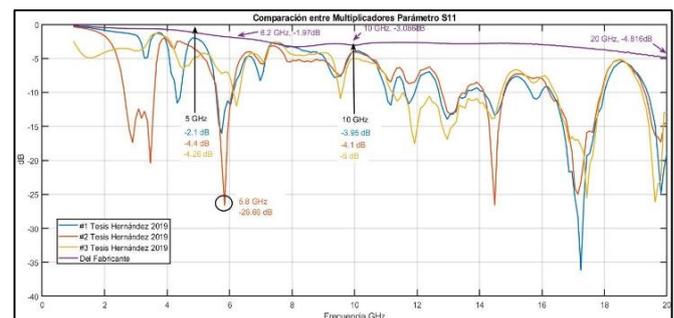


Figura 13. Medición de los multiplicadores de potencia parámetro S11.

En la Fig 13 se observa la medición del parámetro S11 de los multiplicadores de potencia, en la cual se tiene una mayor reflexión en el adquirido al fabricante en la banda de 6.2 a 10 GHz. En la Fig 14 se observa la medición del parámetro S21 en el analizador de espectro. La señal multiplicada por el dispositivo del fabricante tiene mayor potencia en relación a los implementados. Se tomo las medidas con 3 frecuencias diferentes que se observan en las tablas 12,13 y 14.

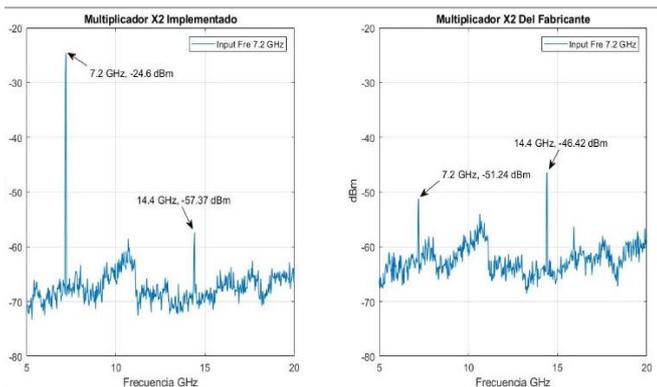


Fig 14. Medición de los multiplicadores de potencia parámetro S21

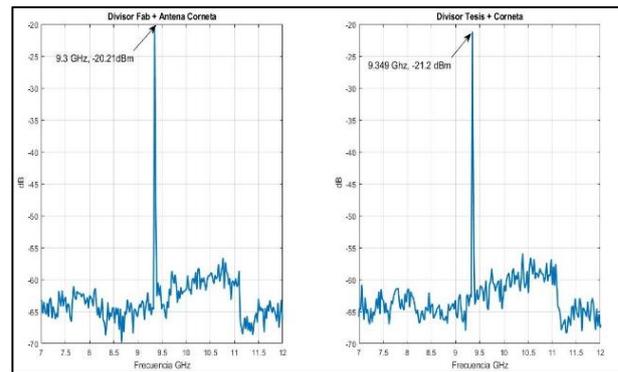


Fig 15. Medición de las señales tanto con el divisor del fabricante (EP2K+) y el implementado.

TABLA 12

MEDICIÓN MULTIPLICADORES DE FRECUENCIA.

Mediciones multiplicadores en la frecuencia original 7.2GHz		
Multiplicador	Frecuencia Original	Frecuencia multiplicadaX2
	7.2 GHz	14.4 GHz
Fabricante	-47.3 dBm	-46.42 dBm
Tesis Hernández	-23 dBm	-57.37 dBm
Mediciones multiplicadores en la frecuencia original 7.6 GHz		
Multiplicador	Frecuencia Original	Frecuencia multiplicadaX2
	7.6 GHz	15.2 GHz
Fabricante	-44.91 dBm	-43.07 dBm
Tesis Hernández	-19.44 dBm	-58.8 dBm
Mediciones multiplicadores en la frecuencia original 8.1 GHz		
Multiplicador	Frecuencia Original	Frecuencia multiplicadaX2
	8.1 GHz	16.2 GHz
Fabricante	-46.4 dBm	-45.5 dBm
Tesis Hernández	-31.5 dBm	-54.4 dBm

Dado los resultados de los dispositivos se realizaron escenarios que pueden presentarse en un ambiente real de comunicaciones en donde estos dispositivos pueden ser usados. Las primeras pruebas se realizaron mediante el divisor de señales adquirido de fábrica y el implementado en el laboratorio. Se transmitieron 3 señales a la misma frecuencia utilizando las antenas cornetas que se encuentran en el laboratorio para verificar su operación y cuanto es el cambio de un divisor a otro. Cabe recalcar que el divisor del fabricante (EP2K+) y el divisor implementado trabajan en sus 3 puertos a 50Ω, por lo que se utilizaron cargas de acoplamiento en el puerto S31 para obtener su respuesta real acoplada y que se semeje a la simulación. Transmitiendo una señal de 9.3 GHz con 16 dBm de potencia en el generador de señales.

En la Fig 15 se observa la medición de las señales tanto con el divisor del fabricante (EP2K+) y el implementado. Se observa que con el divisor del fabricante (EP2K+) se tiene -1.2dBm y con el implementado -20.21 dBm.

TABLA 13

MEDICIONES CON DIFERENTE ANTENAS Y DIVISORES PARA LA FRECUENCIA DE 9.3 GHZ

Divisor con sustrato FR4(corneta)	Divisor con sustrato Roger(corneta)
-21.2 dBm	-19.42 dBm
Divisor Fabricante (Logarítmica)	Divisor con sustrato FR4(Logarítmica)
-47.35 dBm	-47.92 dBm

Se observa que el divisor implementado con FR4 se tiene -21.2 dBm y con el implementado en Roger se tiene -19.42 dBm, dado estos resultados hay una diferencia de 1.78dBm entre los divisores. El divisor del fabricante (EP2K+) se tiene -47.35 dBm y el implementado con FR4 se tiene -47.92dBm, dado estos resultados hay una diferencia de 0.78dBm entre los divisores.

IV. CONCLUSIONES

Las antenas logarítmicas para las bandas X y Ku fueron diseñadas e implementadas con los dos tipos de sustratos, una vez realizadas las mediciones, se concluye que las antenas con sustrato FR4 tiene un promedio en reflexión de -16.8dB, en la banda de 10-20 GHz, presentando una variación del 15% con respecto a la simulación que presenta un valor de -14.40 dB.

Las antenas con sustrato Roger Rt Duroid 5880 presenta un promedio en reflexión de -12.58dB, dando una variación del 22% con respecto a la simulación en donde se tiene -15.38dB. Como parte de la potenciación del laboratorio de Microondas de la FIE se realizaron antenas diseñadas para la banda 20-40 GHz, las cuales presentan un promedio en reflexión de -15.5dB, en la simulación.

Se obtuvieron diferentes resultados, de los divisores de potencia a las diferentes frecuencias, siendo el diseño a 5.8GHz el mejor en comparativa con el dispositivo del fabricante (EP2K+). En los tres parámetros a medir se han obtenido valores positivos, S11 tienen una diferencia de 0.37dB (1.37%) uno con respecto al otro, siendo el fabricante el mejor, pero en el S21 se logra observar que el divisor medido obtiene una mejoría de 0.98dB con respecto al divisor del fabricante



(23.45%). Sin embargo, al realizar pruebas con el generador de señales y con diferentes sustratos, su diferencia a la frecuencia de 9.3GHz se obtiene una media en potencia de 1.11dBm.

El sustrato Roger revela unos resultados más favorables que con sustrato FR4, ya que para los parámetros S11 al comparar entre el divisor implementado con sustrato Roger y del fabricante, su diferencia es de 1.58dB (5.04%) su diferencia es pequeña, mientras que si lo comparamos con sustrato FR4 posee una mejoría mucho mayor este sustrato, de 16.43dB (35.57%), mientras que para el S21, al comparar entre el divisor implementado con sustrato Roger y del fabricante, es 1.92dB (33.02%), pero si lo comparamos con sustrato FR4 posee una diferencia mayor, de 3.358dB (43.37%) y de la misma forma sucede con el parámetro S31.

Al medir el parámetro S11 de los multiplicadores se evidencio que la señal del dispositivo del fabricante tiene una reflexión de 2.5 dB, mientras que la de los implementados tiene en promedio una reflexión de 3.96 dB, siendo en la frecuencia de 5.8 GHz donde existe una mayor reflexión dando un valor de 16.55 dB. El parámetro S21 medido a la señal multiplicada indica que se tiene una variación del 2.31% de la potencia, con respecto a la señal original, sin embargo, en los dispositivos implementados en la tesis de "Hernández 2019" se tiene una variación del 58%, es decir que la señal pierde más de la mitad de la potencia cuando se realiza la multiplicación.

REFERENCIAS

- [1] Huidobro, J. M., & Ordoñez, J. L. (2014). *Comunicaciones por radio: tecnologías, redes y servicios de radiocomunicaciones: el espectro electromagnético*. Alfaomega.
- [2] P. Adhikari, "Understanding millimeter wave wireless communication."
- [3] Peñafiel, O. *Diseño e implementación de una antena logarítmica ultra wide band de 1 a 10 GHz para la caracterización de antenas*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba – Ecuador. 2019.
- [4] Burbano Guerrero, Juan Pablo. *Diseño de divisores de potencia tipo t truncada para banda x, y, ku en tecnología de guía de onda integrada en sustrato (siw)*. Universidad de las Fuerzas Armadas, departamento de Eléctrica y Electrónica, Carrera de Ingeniería En Electrónica y Telecomunicaciones, Sangolquí, Ecuador. 2017.
- [5] Hernández, R. *Implementación de un set de multiplicadores de frecuencia para las bandas c, x y ku de alta frecuencia utilizando tecnología mmic para el laboratorio de comunicaciones y microondas en la Fie-Epoch*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba-Ecuador. 2019..
- [6] Cardama Aznar. et al. *Antenas Segunda*. Barcelona-España: El Tinter. Sal, 2002.
- [7] García Rincón. et al. *Diseño e implementación de un divisor de potencia en banda dual con estructuras metamateriales basadas en CSRRs*. Universidad autónoma de Barcelona, Barcelona España. 2007.pp.7-46.
- [8] Pantoja José, Miguel Miranda. *Ingeniería de microondas: técnicas experimentales*. España-Madrid. Isabel Capella (2002).
- [9] Pozar, David M. "Microwave Engineering." cuarta edición, University of Massachusetts at Amherst, John Wiley & Sons, Inc (2012).